

TRANSMISSION ELECTRIQUE DE PUISSANCE MECANIQUE DESTINEE NOTAMMENT A UNE  
TRANSMISSION DE VEHICULE AUTOMOBILE

La présente invention concerne une transmission électrique de puissance mécanique destinée notamment à une transmission de véhicule automobile.

5           La transmission de puissance mécanique entre une source de mouvement motrice et l'élément à entraîner nécessite très souvent une adaptation de vitesse en fonction des régimes de fonctionnement.

          C'est notamment le cas sur les véhicules automobiles où la motorisation à combustion interne doit pouvoir entraîner les roues depuis l'arrêt jusqu'à leur vitesse  
10           maximale : la transmission comporte alors usuellement un dispositif de couplage autorisant un glissement au moins temporaire (embrayage à friction, embrayage électromagnétique à poudre, convertisseur de couple hydraulique) associé à une démultiplication mécanique de mouvement à rapport variable (boîte de vitesse à rapports discrets, dispositif mécanique à rapport continûment variable).

15           Cette exigence d'adaptation de vitesse se retrouve également dans l'entraînement de certains accessoires.

          Pour assurer cette adaptation, en alternative aux dispositions mécaniques, on peut exploiter des solutions à transmission électrique de puissance : dans un premier temps, la puissance mécanique motrice est transformée en puissance électrique par  
20           une machine électrique génératrice, puis elle est à nouveau convertie sous forme mécanique par un moteur électrique. Les commandes électroniques de la génératrice et du moteur permettent alors un découplage total en vitesse.

          Il est à noter qu'un tel variateur électrique continu ne transmet pas obligatoirement toute la puissance mécanique à transmettre : il peut être utilisé pour  
25           apporter la souplesse nécessaire à des dispositifs mécaniques de transmission comme c'est par exemple le cas dans le système de transmission multimode décrit dans la demande de brevet FR-2 823 281.

          On notera également qu'il est possible d'adjoindre à cette transmission électrique un dispositif de stockage électrique (accumulateur, etc.) qui ouvre des  
30           opportunités additionnelles de gestion des flux d'énergie. Dans le cas d'une

transmission de véhicule automobile par exemple, cette gestion permet notamment des économies de consommation de carburant ou des gains de performances, par exemple : récupération au freinage, plus grande latitude de choix des points de fonctionnement de la source motrice selon des critères de rendement, apports  
5 transitoires de puissances d'appoint, démarrage du moteur thermique. La machine électrique motrice permet aussi dans ce cas de maintenir un entraînement dans les phases où la source motrice mécanique n'est pas disponible.

La transmission électrique comporte cependant en contre partie quelques inconvénients qui en limitent les applications pratiques, et notamment :

- 10 - l'encombrement et la masse des machines électriques et de la mécanique d'intégration associée,
- le rendement, qui résulte du produit des rendements dans la double conversion d'énergie en cascade.

Le document US-6373160 décrit une machine électrique pouvant servir à  
15 transmettre une puissance mécanique entre deux arbres. Le stator présente dans l'entrefer compris entre les deux rotors un seul bobinage extérieur et un seul bobinage intérieur.

Le but de la présente invention est d'apporter des progrès sensibles sur les  
20 points ci-dessus, grâce à des dispositions qui permettent une forte intégration des machines ainsi qu'une réduction importante à la fois des pertes Joule et des pertes dans l'électronique.

Suivant l'invention, la transmission électrique, notamment pour véhicule automobile, comprenant deux machines électriques, l'arbre de l'une des machines  
25 électriques étant relié à une source d'énergie motrice, cette machine convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique, l'autre machine électrique convertissant l'énergie électrique en énergie mécanique, son arbre étant relié à l'élément à entraîner, les rotors des deux machines étant disposés concentriquement ou axialement l'un par rapport à l'autre, ces deux rotors coopérant avec des stators dont  
30 les bobinages sont disposés à l'intérieur de l'espace défini par les deux rotors, est caractérisé en ce que lesdits bobinages comprennent plusieurs bobinages annulaires

juxtaposés dans ledit espace, ces bobinages étant alimentés par des courants alternatifs déphasés les uns par rapport aux autres.

Par rapport à une transmission électrique à deux machines séparées, les dispositions selon l'invention apportent des gains de compacité liés à la forte intégration ainsi que des gains de rendement qui proviennent notamment d'une diminution des pertes Joule liée à l'agencement favorable des bobinages et, dans le cas de la commande à courants composés, à la mise en commun de ces derniers ainsi qu'à une réduction des pertes dans l'électronique de puissance. La présente invention prévoit la disposition de plusieurs bobinages annulaires juxtaposés dans l'espace compris entre deux rotors. Cette disposition permet d'alimenter les bobinages par des courants alternatifs déphasés les uns par rapport aux autres.

Cette transmission peut aussi être utilisée comme moteur de traction double à deux arbres d'entraînement indépendants et assurant de manière électrique la fonction « différentiel ».

Selon d'autres particularités de la transmission électrique selon l'invention :

- l'un des rotors est monté en rotation sur l'arbre de l'autre rotor et entraîne en rotation un arbre décalé axialement de l'arbre du premier rotor;
- les bobinages statoriques sont disposés dans l'espace annulaire compris entre les deux rotors et comprennent une première couche annulaire de bobinages coopérant avec l'un des rotors, entourant une seconde couche annulaire de bobinages coopérant avec l'autre rotor, les deux couches annulaires de bobinages étant liées mécaniquement l'une à l'autre;
- chaque bobinage est disposé dans un noyau en matière ferromagnétique recouvert latéralement de chaque côté par un flasque en matière ferromagnétique comportant en regard du rotor des griffes engagées entre les griffes du flasque situé sur l'autre côté du noyau;
- en variante, chaque bobinage est disposé dans un noyau en matière ferromagnétique recouvert latéralement de chaque côté par un flasque en matière ferromagnétique comportant en regard du rotor des dents dirigées vers le rotor;

- chaque rotor peut comporter à sa périphérie une culasse cylindrique en matière ferromagnétique portant sur sa face interne dirigée vers les bobinages statoriques, une série d'aimants.
- en variante, chaque rotor comporte sur sa périphérie une série de plots ferromagnétiques s'étendant en regard des bobinages statoriques;
- l'espace annulaire compris entre les deux rotors peut comporter une seule série de bobinages juxtaposés;
- selon une variante, les surfaces périphériques des deux rotors sont adjacentes l'une à l'autre et les bobinages annulaires du stator sont situés en regard de la surface interne du rotor qui est situé à l'intérieur de l'autre rotor;
- la transmission peut comprendre un stator constitué par plusieurs galettes juxtaposées comportant chacune un bobinage annulaire et portant sur leur périphérie des griffes ferromagnétiques engagées entre les griffes de la périphérie de la galette voisine, un rotor intermédiaire formant une cage asynchrone comportant des barres conductrices parallèles à l'axe du rotor et une série de plots ferromagnétiques située entre les barres, ce rotor intermédiaire étant entouré par un rotor extérieur comportant des barres conductrices constituées de segments parallèles à l'axe du rotor et décalés angulairement les uns par rapport aux autres et une série de plots ferromagnétiques située entre les barres.

D'autres buts, caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à titre exemplaire à la lecture de la description qui va suivre et à l'examen des dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 est un schéma de principe d'une transmission électrique dont les deux machines ont des induits annulaires intégrés dans des espaces adjacents,
- la figure 1A est un schéma analogue à la figure 1 montrant une disposition axiale des deux machines,
- la figure 2A est une vue éclatée d'une disposition de circuit magnétique à griffes autour d'un bobinage annulaire centralisé,

- la figure 2B est une vue en coupe selon un plan passant par l'axe longitudinal d'un circuit magnétique à griffes avec bobinage annulaire centralisé ; un rotor à aimants de surface est représenté pour aider à la compréhension,
- 5 - la figure 2C est un quart de coupe selon la direction AA de la figure 2B,
- la figure 3 est une vue d'une disposition de circuit magnétique avec bobinage annulaire centralisé dans une configuration à réluctance variable avec bouclage transverse du flux au rotor,
- la figure 4 est une disposition selon l'invention avec mise en commun des bobinages des deux induits,
- 10 - la figure 4a est le schéma électronique d'un onduleur,
- la figure 5 est une vue éclatée d'un bobinage selon la disposition de la figure 4 avec son double système de griffes,
- la figure 6 est un schéma équivalent du circuit magnétique d'un exemple de réalisation à courants composés et flux traversant,
- 15 - la figure 7 est un schéma équivalent globalisé de la figure 6,
- la figure 8 montre des exemples de dispositions à courants composés permettant l'annulation des couples pulsants,
- la figure 9 montre un exemple d'adaptation à l'invention d'une cage asynchrone illustrée en perspective sur le rotor interne ; un espace non magnétique est ménagé entre les circuits magnétiques associés à chaque galette,
- 20 - la figure 10 montre un autre exemple d'adaptation à l'invention d'une cage asynchrone : la vue en perspective ne montre cette fois qu'une moitié de rotor externe ; les barres conductrices comportent des segments décalés angulairement pour réaliser le déphasage souhaité,
- 25 - la figure 11 est un schéma de principe d'une disposition selon l'invention avec rotor intermédiaire à flux traversant et commande à courants composés,
- 30 - la figure 12 est une vue éclatée selon le principe de la figure 11 d'une disposition à rotor intermédiaire à flux traversant et commande à courants composés dans une configuration à cages asynchrones.

La figure 1 représente une transmission électrique, comportant un arbre d'entrée 1 relié au moteur, solidaire d'un disque 2 portant un élément magnétique 3 de forme cylindrique centré sur l'axe X-X' de l'arbre 1.

5 Autour de l'arbre 1 est monté en rotation libre par rapport à cet arbre, un second disque 4 adjacent au premier disque 2. Ce second disque 4 porte un élément magnétique 5 de forme cylindrique, entourant annulairement le premier élément magnétique 3.

10 Dans l'espace annulaire compris entre les deux éléments magnétiques 3 et 5 sont disposés une première série de trois bobinages annulaires 6 adjacents au premier élément 3 et entourés par une seconde série de trois bobinages annulaires 7 adjacents au second élément 5. Les bobinages annulaires 6 et 7 sont solidaires d'une partie fixe 8. Les bobinages 6 sont reliés à une électronique 9. Les bobinages 7 sont reliés à une électronique 10. Les électroniques 9 et 10 sont alimentées par une batterie 11.

15 Par ailleurs, le disque 4 est relié par des pignons 12, 13 à un arbre de sortie 14 s'étendant parallèlement à l'arbre d'entrée 1.

Selon l'invention, les induits des deux machines électriques ont, au stator, des circuits magnétiques organisés autour de bobinages annulaires et réunis dans des espaces adjacents comme l'indique en coupe le schéma de principe de la figure 1.  
20 Sur cette figure 1, on représente en coupe trois bobinages annulaires et leurs circuits magnétiques placés côte à côte et centrés sur l'axe de révolution commun X-X'.

Comme cela apparaît sur la figure 1, les entrefers associés respectivement aux induits sont cylindriques, c'est-à-dire traversés de manière radiale par les flux magnétiques. Une transposition avec flux axial de l'invention est cependant possible, 25 comme le montre l'exemple de la figure 1A : on y retrouve les deux machines avec leurs stators adjacents à bobinages annulaires 6, 7, mais leurs circuits magnétiques s'ouvrent sur des entrefers plans ; les rotors, positionnés de part et d'autre de l'ensemble statorique, prennent des formes de disques 2, 4 ; les paliers permettent les mouvements de rotation déjà décrits, et maintiennent de plus axialement les pièces 30 tournantes contre les efforts d'attraction électromagnétiques générés dans les entrefers.

Selon un premier mode de réalisation, le couplage magnétique à son entrefer d'un de ces bobinages peut être réalisé par un double système de griffes comme cela est représenté en vue éclatée sur la figure 2A. Le flux multipolaire collecté au niveau de l'entrefer est ainsi globalisé dans le noyau (ou culasse) sur lequel est enroulé le bobinage.

La figure 2B donne une vue schématique en coupe selon un plan passant par l'axe longitudinal ; pour faciliter la compréhension on y a représenté la circulation du flux dans le stator et on a disposé en regard de ce stator un exemple de rotor constitué d'une culasse prenant la forme d'un anneau ferromagnétique portant des aimants de surface magnétisés de manière radiale et avec des polarités alternées.

La figure 2C complète cette représentation par une vue en quart de coupe AA de la figure 2B selon l'axe longitudinal.

Sur ces figures 2A, 2B, 2C, la référence 7 désigne un bobinage annulaire. La référence 14a désigne le noyau ou culasse ferromagnétique du bobinage 7. La référence 5 désigne le rotor, représenté ici avec des aimants de surface avec une culasse ferromagnétique de bouclage de flux. Les références 15 et 16 désignent le double système de griffes.

Sur la figure 2B la référence 17 montre la ligne de circulation du flux magnétique entre le rotor 5, les premières griffes 15, le noyau 14a du bobinage 7 et les secondes griffes 16.

On comprend que, en adaptant les proportions données sur ces figures, et notamment en augmentant l'alésage central dans le noyau, on peut ainsi constituer de la sorte un des circuits magnétiques représenté en regard de l'entrefer 2 (externe) sur la figure 1.

De la même façon, en inversant la disposition radiale relative du rotor et du stator, on peut réaliser un des circuits magnétiques représenté en regard de l'entrefer 1 (entre le rotor 3 et les bobinages) sur la figure 1 : les systèmes de griffes assurent alors un couplage avec un entrefer intérieur. Les proportions ayant été adaptées, ce deuxième ensemble peut être logé à l'intérieur de l'alésage central du premier, avec une épaisseur longitudinale identique.

On désignera par « galette » l'ensemble ainsi formé selon une tranche axiale de la machine et comportant pour chaque induit un bobinage annulaire et le circuit

magnétique associé, ainsi que les deux parties de rotor en vis à vis. La figure 1 représente donc une machine constituée de trois galettes.

Les parties actives des rotors peuvent être réalisées de très nombreuses façons selon les principes usuels de construction des machines électriques : dispositions à  
5 aimants de surface, aimants insérés, aimants enterrés, cage asynchrone, saillance réluctante synchrone, ou encore combinaisons de ces principes. Deux particularités seront cependant à noter : l'une est relative à un espacement non magnétique qu'il peut être utile de ménager entre les parties de circuits magnétiques rotor de chaque galettes successives pour éviter un couplage indésirable entre galettes voisines ;  
10 l'autre concerne les précautions à prendre dans les dispositions asynchrones pour éviter les cheminements de courants intermédiaires entre les anneaux de court-circuit. Ces deux points seront explicités plus loin dans le texte.

Il est à remarquer que les circuits magnétiques, aussi bien aux stators qu'aux rotors, sont parcourus par des flux alternatifs : pour éviter le développement de  
15 courants de Foucault en leur sein, il convient de choisir des matériaux ferromagnétiques électriquement résistifs. La solution traditionnelle de « feuilletage » par juxtaposition de tôles magnétiques isolées entre elles peut convenir dans les portions de circuit magnétique où les lignes de champ demeurent  
sensiblement dans un même plan ; au stator toutefois, le caractère tri-dimensionnel de  
20 la circulation du flux invite à recourir à des matériaux magnétiques composites (« poudres de fer », Soft Magnetic Composites) comme ceux que proposent par exemple les sociétés Hoganas en Suède ou Quebec Metal Powder au Canada.

Pour faciliter la fabrication notamment dans le cas des réalisations de grandes dimensions, les pièces réalisées en « poudre de fer » (Soft Magnetic Composite :  
25 SMC) peuvent être sectorisées en éléments plus petits que l'on assemble. Les bonnes tolérances obtenues dans le formage des pièces SMC évite généralement la nécessité de reprise d'usinage.

Dans les dispositions comportant des aimants, ceux-ci doivent également être électriquement résistifs ou bien encore fragmentés en éléments isolés.

30 Le fonctionnement général de chaque machine repose sur la construction polyphasée des efforts : au niveau d'un entrefer i donné, les parties actives du stator et du rotor en vis à vis sont décalées successivement d'un angle de  $2\pi/n/p$ , en valeur



relative, si on désigne par  $p_i$  le nombre de paires de pôles sur cet entrefer, c'est-à-dire le nombre de paires de griffes, et par  $n$  le nombre de phases. Ainsi, l'alimentation des bobinages d'un induit par un onduleur électronique avec un système  $n$ -phasé de courants permet d'obtenir un couple résultant global sensiblement constant au niveau de cet entrefer. Naturellement, le calage temporel de ces courants doit être piloté à partir des informations de position (cas des machines synchrones) ou éventuellement de vitesse (cas asynchrone) selon les techniques connues.

Le décalage angulaire relatif entre galettes peut être obtenu partiellement ou totalement tant en jouant sur la position angulaire successive des systèmes de griffes que sur celle des parties actives du rotor.

Le nombre de galettes doit être un multiple du nombre de phases ; sur la représentation de la figure 1 par exemple, chaque galette correspond à une phase : le système est triphasé.

Selon un deuxième mode de réalisation, le couplage d'un bobinage à son entrefer est obtenu par une disposition homopolaire à réluctance variable avec bouclage transverse du flux au rotor. Cette disposition est illustrée dans son principe sur la figure 3. Le bobinage reste annulaire, mais le couplage à l'entrefer s'opère non plus par des griffes mais par une double denture. Les dents de chaque denture sont en nombre identique et en regard. En vis à vis, le rotor porte un nombre de plots ferromagnétiques correspondant à ces paires de dents. (NB: pour simplifier l'illustration, un seul plot de ce type apparaît sur la figure 3). Lorsqu'ils sont en regard des dents, les plots permettent entre elles une liaison magnétique transverse: la perméance maximale associée au bobinage est maximale; lorsqu'ils sont au contraire en regard des encoches, la perméance est minimale. On comprend que cette disposition permet de créer un couple réluctant.

Sur la figure 3, la référence 7 désigne un bobinage annulaire. La référence 14a désigne le noyau ou culasse ferromagnétique du bobinage 7. La référence 5 désigne le rotor, constitué dans cet exemple par des plots ferromagnétiques tournants.

La référence 18 désigne deux plateaux ferromagnétiques dentelés disposés de part et d'autre du bobinage 7. La référence 19 désigne la circulation du flux magnétique entre le rotor 5, le premier plateau 18, la culasse 14a et le second plateau 18.

Comme précédemment avec les systèmes de griffes, on peut construire ainsi une double machine composée de galettes successives. Avec les décalages angulaires déjà mentionnés entre galettes et l'alimentation par onduleur n-phasé de chaque induit, on obtient à volonté des couples résultants utiles sur chaque entrefer.

5 Les observations relatives aux choix de matériaux des circuits magnétiques demeurent valables ici; la figure 3 suggère une réalisation avec un noyau en "poudre de fer" et des dentures constituées d'assemblages de tôles. On peut également utiliser une disposition où des paquets de tôles forment des arceaux successifs disposés en éventails. Les plots magnétiques peuvent être constitués de tôles ou de poudres de  
10 fer. Leur assemblage n'a pas été représenté: ils peuvent être liés entre eux dans un matériau surmoulé résistif au plan électrique et qui va assurer la liaison mécanique au rotor.

Comme indiqué plus haut et d'une manière générale pour les dispositions selon l'invention, il convient de tenir compte des couplages magnétiques parasites par les  
15 fuites entre galettes voisines. Un premier moyen de limiter ce couplage consiste à ménager un espace non magnétique entre les stators successifs des galettes voisines. Cet espace peut par exemple être mis à profit pour introduire un circuit de refroidissement. Un autre moyen, qui peut être plus adapté pour obtenir une bonne compacité axiale, consiste à introduire cet espace non magnétique entre les parties  
20 magnétiques successives des rotors, au niveau des frontières entre galettes.

Les pertes Joule de ces structures sont particulièrement réduites en raison de plusieurs facteurs bénéfiques, notamment: une géométrie circulaire des bobinages qui réduit considérablement la longueur de cuivre - c'est le circuit magnétique qui est déformé - ; un compromis "section d'encoche" / "section de passage du flux dans le  
25 fer" moins contraint que dans les structures usuelles à 2 dimensions de circulation du flux; des coefficients de remplissage d'encoche en cuivre plus élevés avec de plus une simplicité de fabrication des bobinages. Ce faible niveau des pertes Joule est un atout au plan du rendement et de la thermique.

Une autre disposition selon l'invention est illustrée dans son principe sur la  
30 figure 4. Les deux induits sont inspirés de la disposition à bobinages circulaires déjà représentée sur la figure 1. A la différence de la configuration 1 cependant, il n'y a plus qu'un bobinage 7 par galette au lieu de 2: ce bobinage 7 est commun aux deux

induits; les culasses magnétiques qui séparaient auparavant les bobinages de la figure 1 ont disparus; les circuits magnétiques fixes des deux induits sont mis en commun; le flux principal collecté au niveau de l'entrefer 1 (entre le rotor 3 et les bobinages) se compose ainsi avec celui issu de l'entrefer 2 (entre le rotor 5 et les bobinages). On  
5 dira que le circuit magnétique des parties fixes des induits est à "flux traversant".

Là où, dans les dispositions précédemment décrites, il y avait deux onduleurs alimentant chacun les bobinages polyphasés propres à chaque induit, on n'utilise plus maintenant qu'un unique onduleur commun 9 : il va alimenter les bobinages par des courants polyphasés comportant deux composantes superposées.

10 La figure 4A montre le schéma d'un onduleur 9. Sur cette figure, la référence 20 désigne un bras de pont.

On désignera par la suite ce principe de superposition de courants par l'expression "commande à courants composés". Des commandes de ce type ont déjà été décrites dans d'autres conditions dans des brevets comme ceux des références  
15 US6373160, US6049152, EP1089425. Elles seront présentées plus loin de manière plus explicite dans le cadre de l'invention.

Comme on le verra plus loin, le choix d'une disposition à 6 galettes sur la figure 4 correspond à l'une des possibilités d'exploitation de la commande à courants composés qui permet de s'affranchir des ondulations de couple parasites.

20 Les hauteurs de stator de la figure 1 ont été globalement conservées pour mettre en évidence l'accroissement de section possible du bobinage unique par rapport à chacun des bobinages antérieurs.

Le stockage d'énergie électrique est toujours facultatif.

Pour faciliter la compréhension, la figure 5 propose une vue éclatée indicative  
25 d'une bobine 7 et du double système de griffes 15, 15a ; 16, 16a qui lui est associé; l'ensemble est positionné en regard des deux rotors 3, 5.

Les rotors 3, 5 ont été représentés de manière schématique avec des aimants de surface sur les deux entrefers; chacun de ces groupes d'aimants est disposé sur un anneau ferromagnétique (respectivement interne et externe) qui assure le bouclage du flux. Cette hypothèse, commode pour la visualisation et le raisonnement, servira de  
30 base au développement de la présentation de la commande à courants composés qui suit, mais, comme cela a déjà été observé précédemment, de nombreux autres modes

de réalisation sont possibles, voire préférables si l'on considère la contrainte de tenue à la démagnétisation des aimants (aimants insérés, aimants enterrés, asynchrone, réluctance par exemple avec bouclage transverse des flux comme sur la figure 3, et combinaisons).

5 On va maintenant décrire le fonctionnement d'une disposition de ce type alimentée par courants composés.

Les nombres de griffes de chaque entrefer correspondent aux nombres d'aimants qui sont en vis à vis; il y a ainsi  $p_1$  et  $p_2$  paires de pôles respectivement sur chaque entrefer.

10 Le nombre  $n$  de galettes est choisi pour être un multiple commun de  $n_1$  et de  $n_2$ :

$$\begin{cases} n=k_1.n_1 \\ n=k_2.n_2 \end{cases} \quad \text{avec } k_1 \text{ et } k_2 \text{ entiers.}$$

15 Au niveau de l'entrefer 1, la disposition successive des galettes comporte un déphasage angulaire de  $2\pi/(n_1.p_1)$ ; ce déphasage peut être obtenu soit en jouant sur le calage angulaire du groupe d'aimants associé à cette galette au niveau de l'entrefer 1, soit au niveau du groupe de griffes correspondant du rotor de la source motrice. Ainsi, par rapport à l'entrefer 1, le système est électriquement à  $n_1$  phases.

20 De même, au niveau de l'entrefer 2, la disposition successive des galettes comporte un déphasage angulaire de  $2\pi/(n_2.p_2)$ ; ce déphasage peut être obtenu soit en jouant sur le calage angulaire du groupe d'aimants associé à cette galette au niveau de l'entrefer 2, soit au niveau du groupe de griffes fixes correspondant. Ainsi, par rapport à l'entrefer 2, le système est électriquement à  $n_2$  phases.

25  $\alpha_1$  est la position angulaire relative du rotor associé à l'entrefer 1.

$\alpha_2$  est la position angulaire du rotor associé à l'entrefer 2.

Ainsi, en notant  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$  les vitesses respectives des rotors:

$$\Omega_1 = \frac{d\alpha_1}{dt} \quad \text{et} \quad \Omega_2 = \frac{d\alpha_2}{dt}$$

30 On notera  $\omega_1 = p_1.\Omega_1$  et  $\omega_2 = p_2.\Omega_2$  les pulsations électriques associées respectivement aux 2 entrefers.

$\Theta_{a1}$ ,  $\Theta_{a2}$  et  $\Theta_b$  seront respectivement les potentiels magnétiques des aimants de l'entrefer 1, de l'entrefer 2 et celui de la bobine (c'est à dire, ses ampères-tours).

Un seul onduleur (voir figure 4) remplace les deux onduleurs précédemment nécessaires aux dispositions à induits séparés comme celle de la figure 1. Cet onduleur unique comporte un nombre de bras correspondant à un multiple commun de  $n_1$  et  $n_2$  de préférence le plus petit multiple commun. Ce nombre de bras correspond au nombre de galettes, à moins que chaque système polyphasé ne comporte plusieurs groupes de phases identiques: dans ce cas, les bobinages de même calage peuvent être raccordés en parallèle ou en série.

Selon le principe connu de découpage par commutation des composants électroniques, et en exploitant l'information angulaire  $\alpha_1$ , l'onduleur peut ainsi générer dans chacun des  $k_1$  groupes de galettes à  $n_1$  phases un système de courants polyphasé de pulsation  $\omega_1$ ; au sein d'un groupe, chaque courant est successivement déphasé de  $2\pi/n_1$  et la somme des courants est nulle.

De la même façon, l'onduleur peut aussi générer dans chacun des  $k_2$  groupes de galettes à  $n_2$  phases un système de courants polyphasé de pulsation  $\omega_2$ ; au sein d'un groupe, chaque courant est successivement déphasé de  $2\pi/n_2$  et la somme des courants est nulle.

La sommation des consignes permet d'obtenir une superposition des 2 systèmes polyphasés, et une galette  $i$  sera parcourue par des courants lui conférant un potentiel magnétique:

$$\Theta_{b\_i} = \Theta_{b1} \cdot \sin(p_1 \cdot \alpha_1 + \varphi_1 - \frac{2\pi}{n_1} \cdot i) + \Theta_{b2} \cdot \sin(p_2 \cdot \alpha_2 + \varphi_2 - \frac{2\pi}{n_2} \cdot i)$$

soit encore, en remplaçant  $n_1$  et  $n_2$  par leur valeur en fonction de  $n$ :

$$\Theta_{b\_i} = \Theta_{b1} \cdot \sin(p_1 \cdot \alpha_1 + \varphi_1 - \frac{2\pi}{n} \cdot k_1 \cdot i) + \Theta_{b2} \cdot \sin(p_2 \cdot \alpha_2 + \varphi_2 - \frac{2\pi}{n} \cdot k_2 \cdot i)$$

où  $\Theta_{b1}$  et  $\Theta_{b2}$ ,  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont des amplitudes et des phasages réglables par la commande électronique.

On s'intéresse maintenant au fonctionnement du circuit magnétique.

La figure 6 donne un schéma équivalent du circuit magnétique ainsi défini sur une galette. Les pièces ferromagnétiques ont été idéalisées comme conducteurs

parfaits de flux (perméances infinies). On considère par ailleurs le circuit magnétique comme linéaire. Les perméances représentées sous forme grisée symbolisent les chemins de fuite; (fuites entre griffes, fuites réparties sur le bobinage).

Ce schéma est globalisé sur la figure 7.

- 5 On décrit le couplage magnétique des aimants avec les griffes par un ensemble de perméances  $\Lambda_{\delta+1}$  ou 2 et  $\Lambda_{\delta-1}$  ou 2 variables avec la position et qui intègrent la perméance d'entrefer et la perméance interne d'aimant.

On admettra que l'on peut rendre compte de ces variations par:

$$\Lambda_{\delta-1ou2}^+ = \frac{\Lambda_{\delta-1ou2max}}{2} \cdot \cos(p_{1ou2} \cdot \alpha_{1ou2}) + \frac{\Lambda_{\delta-1ou2max}}{2}$$

$$\Lambda_{\delta-1ou2}^- = \frac{-\Lambda_{\delta-1ou2max}}{2} \cdot \cos(p_{1ou2} \cdot \alpha_{1ou2}) + \frac{\Lambda_{\delta-1ou2max}}{2}$$

10

Dans ces conditions, le couple électromagnétique d'une galette au niveau de l'entrefer 1 s'écrit:

$$C_{\delta 1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d\Lambda_{a1a1}}{d\alpha_1} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d\Lambda_{a2a2}}{d\alpha_1} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d\Lambda_{bb}}{d\alpha_1} \cdot \Theta_b^2 + \frac{d\Lambda_{a1a2}}{d\alpha_1} \cdot 2\Theta_{a1} \cdot 2\Theta_{a2} +$$

$$15 \quad \frac{d\Lambda_{a1b}}{d\alpha_1} \cdot 2\Theta_{a1} \cdot \Theta_b + \frac{d\Lambda_{a2b}}{d\alpha_1} \cdot 2\Theta_{a2} \cdot \Theta_b$$

et au niveau de l'entrefer 2:

$$C_{\delta 2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d\Lambda_{a1a1}}{d\alpha_2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d\Lambda_{a2a2}}{d\alpha_2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d\Lambda_{bb}}{d\alpha_2} \cdot \Theta_b^2 + \frac{d\Lambda_{a1a2}}{d\alpha_2} \cdot 2\Theta_{a1} \cdot 2\Theta_{a2} +$$

$$20 \quad \frac{d\Lambda_{a1b}}{d\alpha_2} \cdot 2\Theta_{a1} \cdot \Theta_b + \frac{d\Lambda_{a2b}}{d\alpha_2} \cdot 2\Theta_{a2} \cdot \Theta_b$$

avec  $\Lambda_{a1b}$ : perméance mutuelle entre aimants a1 et bobine b, etc.

Les termes affectés du coefficient  $\frac{1}{2}$  correspondent aux composantes réluctantes.

On va maintenant évaluer chacun des termes de ces expressions des couples.

Remarque préliminaire: les aimants étant "éteints" (court-circuit), les groupes de perméances entrefer-aimants repérés par un cerclage sur la figure 7 ont respectivement une valeur équivalente de:

5

$$\Lambda_{Griffes1+_{-}1-} = (p_1 \cdot \Lambda_{\delta 1+} + p_1 \cdot \Lambda_{\delta 1-}) \text{ en série avec } (p_1 \cdot \Lambda_{\delta 1-} + p_1 \cdot \Lambda_{\delta 1+}) =$$

$$\frac{p_1 \cdot \Lambda_{\delta 1+} + p_1 \cdot \Lambda_{\delta 1-}}{2} = \frac{p_1 \cdot \Lambda_{\delta 1 \max}}{2}$$

$$\Lambda_{Griffes2+_{-}2-} = \frac{p_2 \cdot \Lambda_{\delta 2 \max}}{2}$$

c'est-à-dire une valeur constante.

10

Evaluation des couples réductants en  $\frac{d\Lambda_{a1a1}}{d\alpha_2}$ ,  $\frac{d\Lambda_{a2a2}}{d\alpha_1}$ ,  $\frac{d\Lambda_{bb}}{d\alpha_1}$  et  $\frac{d\Lambda_{bb}}{d\alpha_2}$

Il en résulte de la remarque préliminaire que:

15

$$\frac{d\Lambda_{a1a1}}{d\alpha_2} = \frac{d\Lambda_{a2a2}}{d\alpha_1} = \frac{d\Lambda_{bb}}{d\alpha_1} = \frac{d\Lambda_{bb}}{d\alpha_2} = 0$$

=> ces couples réductants sont nuls sur chaque galette

Evaluation des couples réductants en  $\frac{d\Lambda_{a1a1}}{d\alpha_1}$  et  $\frac{d\Lambda_{a2a2}}{d\alpha_2}$

Le calcul de  $\Lambda_{a1a1}$  conduit à une formulation du type:

20

$$\Lambda_{a1a1} = -\Lambda_{a1a1 \max} \cdot \cos^2(p_1 \cdot \alpha_1) + cste$$

avec:

$$\Lambda_{a1a1 \max} = \frac{\Lambda_{Griffes1+_{-}1-}}{1 + \frac{\Lambda_{fg1} + \Lambda_{Griffes2+_{-}2-} + \Lambda_{fg2} + \Lambda_{fp}}{\Lambda_{Griffes1+_{-}1-}}} \quad \text{donc } \Lambda_{a1a1 \max} < \Lambda_{Griffes1+_{-}1-}$$

Sur une galette, il existe donc un couple réductant associé aux aimants dans l'entrefer 1:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{d\Lambda_{a1a1}}{d\alpha_1} \cdot (2\Theta_a)^2 = p_1 \cdot \Lambda_{a1a1 \max} \cdot \sin(p_1 \alpha_1) \cdot \cos(p_1 \alpha_1) \cdot (2\Theta_a)^2 =$$

$$\frac{p_1 \cdot \Lambda_{a1a1 \max}}{2} \cdot \sin(2 p_1 \alpha_1) \cdot (2\Theta_a)^2$$

Ce couple sur une galette est pulsant à 2 fois la fréquence synchrone de l'entrefer 1; il est proportionnel au nombre de pôles  $p_1$ ; les fuites tendent à l'atténuer.

5 Sa composition polyphasée sur l'ensemble des galettes donne cependant une résultante nulle; (sauf pour le cas particulier où  $n=2$  qui s'apparente en fait au monophasé, avec deux bobinages en opposition de phase).

De même, il existe dans l'entrefer 2 au niveau de chaque galette un couple réluctant pulsant associé aux aimants 2; il est proportionnel au nombre de pôles  $p_2$  et les fuites tendent à l'atténuer. A nouveau, la résultante polyphasée en est nulle sauf  
10 pour le cas  $n=2$ .

15

Evaluation des couples d'interaction entre aimants des deux entrefers (termes en  $\frac{d\Lambda_{a1a2}}{d\alpha_1}$  et  $\frac{d\Lambda_{a1a2}}{d\alpha_2}$ )

Le calcul de  $\Lambda_{a1a2}$  sur la galette  $i$  conduit à:

$$\Lambda_{a1a2} = \Lambda_{a1a2 \max} \cdot \cos\left(p_1 \cdot \alpha_1 - \frac{2\Pi}{n} \cdot k_1 \cdot i\right) \cdot \cos\left(p_2 \cdot \alpha_2 - \frac{2\Pi}{n} \cdot k_2 \cdot i\right)$$

avec, lorsque les perméances de fuite peuvent être négligées:

20

$$\Lambda_{a1a2 \max} = \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{Griffes \ 1+ \ 1-}} + \frac{1}{\Lambda_{Griffes \ 2+ \ 2-}}}$$

Les perméances de fuite conduisent en pratique à une réduction de ce terme, la formulation complète étant:



$$\Lambda_{a1a2\max} = \frac{\Lambda_{Griffes2+-2-}}{\Lambda_{Griffes2+-2-} + \Lambda_{fg2} + \Lambda_{fp}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{Griffes1+-1-}} \cdot \left( \frac{\Lambda_{fg1}}{\Lambda_{Griffes2+-2-} + \Lambda_{fg2} + \Lambda_{fp}} + 1 \right) + \frac{1}{\Lambda_{Griffes2+-2-} + \Lambda_{fg2} + \Lambda_{fp}}}$$

Ainsi, le couple lié à l'interaction entre groupes d'aimants 1 et 2 est sur l'entrefer 1 de la galette i de:

$$5 \quad \frac{d\Lambda_{a1a2}}{d\alpha_1} \cdot 2\Theta_{a1} \cdot 2\Theta_{a2} = -p_1 \Lambda_{a1a2\max} 2\Theta_{a1} \cdot 2\Theta_{a2} \sin(p_1 \alpha_1 - \frac{2\Pi}{n} k_1 i) \cdot \cos(p_2 \alpha_2 - \frac{2\Pi}{n} k_2 i)$$

soit encore:

$$\frac{d\Lambda_{a1a2}}{d\alpha_1} \cdot 2\Theta_{a1} \cdot 2\Theta_{a2} = -\frac{p_1 \cdot \Lambda_{a1a2\max}}{2} \cdot 2\Theta_{a1} \cdot 2\Theta_{a2} \cdot (\sin(p_1 \alpha_1 + p_2 \alpha_2 - \frac{2\Pi}{n} \cdot (k_1 + k_2) \cdot i) + \sin(p_1 \alpha_1 - p_2 \alpha_2 - \frac{2\Pi}{n} \cdot (k_1 - k_2) \cdot i))$$

La galette en question est par conséquent soumise sur l'entrefer 1 à un couple pulsant qui comporte 2 composantes: une à la pulsation  $\omega_1 + \omega_2$  et l'autre à  $|\omega_1 - \omega_2|$ .

Cependant, à l'exception de certains cas particuliers comme par exemple celui où les 2 entrefers ont le même nombre de phases:  $n_1 = n_2$  (voir annexe à titre indicatif), les résultantes polyphasées en  $\omega_1 + \omega_2$  et en  $|\omega_1 - \omega_2|$  sont nulles. C'est le cas notamment pour les exemples du tableau de la figure 8.

De manière symétrique, au niveau de l'entrefer 2 d'une galette, il existe un couple pulsant avec une composante à  $\omega_1 + \omega_2$  et une autre à  $|\omega_1 - \omega_2|$ . Sous les mêmes conditions de nombre de phases que ci-dessus, les résultantes polyphasées s'annulent également sur cet entrefer 2.

20 Evaluation de l'interaction entre aimants et bobine (termes en

$$\frac{d\Lambda_{a1b}}{d\alpha_1} \text{ et } \frac{d\Lambda_{a2b}}{d\alpha_2}; \frac{d\Lambda_{a1b}}{d\alpha_2} \text{ et } \frac{d\Lambda_{a2b}}{d\alpha_1})$$

Le calcul de  $\Lambda_{a1b}$  conduit à:  $\Lambda_{a1b} = \Lambda_{a1b\max} \cdot \cos(p_1 \alpha_1 - \frac{2\Pi}{n} k_1 i)$

avec, pour mémoire:

$$\Lambda_{a1b \max} = \frac{1}{\left( \frac{1}{\Lambda_{Griffes\_1+\_1-}} + \frac{1}{\Lambda_{fg1} + \Lambda_{Griffes\_2+\_2-} + \Lambda_{fg2}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{\Lambda_{fg1}}{\Lambda_{Griffes\_2+\_2-} + \Lambda_{fg2}} \right)}$$

5

ou encore si les termes de fuite pouvaient être négligés:

$$\Lambda_{a1b \max} = \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{Griffes\_1+\_1-}} + \frac{1}{\Lambda_{Griffes\_2+\_2-}}}$$

10 De même, le calcul de  $\Lambda_{a2b}$  conduit à:  $\Lambda_{a2b} = \Lambda_{a2b \max} \cdot \cos(p_2 \cdot \alpha_2 - \frac{2\Pi}{n} k_2 i)$

avec d'ailleurs, si les termes de fuite pouvaient être négligés:  $\Lambda_{a2b \max} = \Lambda_{a1b \max}$

Ce sont donc les termes en  $\frac{d\Lambda_{a1b}}{d\alpha_1}$  et  $\frac{d\Lambda_{a2b}}{d\alpha_2}$  qui traduisent le couplage de la bobine avec les aimants; les termes en  $\frac{d\Lambda_{a1b}}{d\alpha_2}$  et  $\frac{d\Lambda_{a2b}}{d\alpha_1}$  ne produisent pas d'effort

15 Pour construire un couple moyen utile dans l'entrefer 2 suppose une composante de courant à la pulsation  $\omega_2$  synchrone de  $p_2\alpha_2$ .

Si l'on suppose ainsi que, par une commande électronique appropriée, on génère sur chaque galette i:

$$\Theta_{b\_i} = \Theta_{b1} \cdot \sin(p_1 \cdot \alpha_1 + \varphi_1 - \frac{2\Pi}{n} k_1 i) + \Theta_{b2} \cdot \sin(p_2 \cdot \alpha_2 + \varphi_2 - \frac{2\Pi}{n} k_2 i)$$

20 alors, il apparaît dans l'entrefer 1 de la galette i un couple:

$$\frac{d\Lambda_{a1b}}{d\alpha_1} \cdot 2\Theta_{a1} \cdot \Theta_b = -p_1 \cdot \Lambda_{a1b \max} \cdot 2 \cdot \Theta_{a1} \cdot \sin(p_1 \cdot \alpha_1 - \frac{2\Pi}{n} k_1 i) \cdot (\Theta_{b1} \cdot \sin(p_1 \cdot \alpha_1 + \varphi_1 - \frac{2\Pi}{n} k_1 i) + \Theta_{b2} \cdot \sin(p_2 \cdot \alpha_2 + \varphi_2 - \frac{2\Pi}{n} k_2 i))$$

que l'on peut mettre sous la forme:

$$\frac{d\Lambda_{alb}}{d\alpha_1} \cdot 2\Theta_{a1} \cdot \Theta_b = \frac{-p_1 \cdot \Lambda_{alb\max}}{2} \cdot 2\Theta_{a1} \cdot (\Theta_{b1} \cdot (\cos\varphi_1 - \cos(2p_1\alpha_1 + \varphi_1 - \frac{4\pi}{n}k_1j)) + \Theta_{b2} \cdot (\cos(p_1\alpha_1 - p_2\alpha_2 - \varphi_2 - \frac{2\pi}{n}(k_1 - k_2)j) - \cos(p_1\alpha_1 + p_2\alpha_2 + \varphi_2 - \frac{2\pi}{n}(k_1 + k_2)j)))$$

Donc, au niveau de l'entrefer 1 sur une galette: l'interaction bobine-groupe 1  
5 d'aimants se traduit par une composante utile continue, et 3 composantes pulsantes respectivement à  $\omega_1$ ,  $\omega_1 + \omega_2$ , et  $|\omega_1 - \omega_2|$ .

La résultante en  $\omega_1$  est nulle pour  $n_1 > 2$ . Les deux autres composantes pulsantes ont également des résultantes nulles sauf cas particuliers déjà évoqués; elles sont nulles en particulier pour les exemples de la figure 8.

10 Symétriquement, on obtient un résultat similaire dans l'entrefer 2.

#### Bilan des couples

15 Finalement, en prenant en compte la résultante des couples sous les conditions d'annulation des composantes pulsantes:  
sur l'entrefer 1:

$$C_{\delta 1} = -\frac{n \cdot p_1 \cdot \Lambda_{alb\max}}{2} \cdot 2 \cdot \Theta_{a1} \cdot \Theta_{b1} \cdot \cos\varphi_1$$

sur l'entrefer 2:

$$C_{\delta 2} = -\frac{n \cdot p_2 \cdot \Lambda_{a2b\max}}{2} \cdot 2 \cdot \Theta_{a2} \cdot \Theta_{b2} \cdot \cos\varphi_2$$

20 L'accroissement des couples avec le nombre de pôles, dans la limite des effets parasites croissants liés aux fuites, est un effet naturel des structures à induit globalisé: la multiplication des pôles ne génère pas de contrainte sur la section du bobinage.

En régime établi, on ajuste le couple du premier entrefer pour équilibrer celui  
25 de la source motrice en jouant sur  $\Theta_{b1} \cdot \cos\varphi_1$ . Le couple sur le rotor de sortie est ensuite réglé en jouant sur le couple du 2e entrefer par  $\Theta_{b2} \cdot \cos\varphi_2$ .

La disposition selon l'invention qui vient d'être décrite avec commande à courants composés permet bien d'obtenir la fonction recherchée de transmission électrique.

Sa comparaison aux dispositions à bobinages séparés dépasse le cadre de cette présentation, mais on peut toutefois noter qualitativement les points suivants:

- les aimants et les culasses de bouclage de flux associées sont traversés par des composantes de flux pulsantes: pour se prémunir contre le développement de courants de Foucault en leur sein, il est souhaitable que ces aimants soient à résistivité électrique interne élevée ou fractionnés en éléments de faible longueur isolés les uns et des autres; la constitution des culasses doit de même être adaptée aux flux variables (feuilletage, "poudres de fer"...)

- comme dans les dispositions à induits séparés, la question des couplages parasites entre galettes voisines négligée en première approche ci-dessus doit être prise en considération: comme cela a déjà été observé, en alternative à l'espacement des galettes, il peut être préférable de pratiquer des coupures magnétiques annulaires dans les espaces médians entre galettes au niveau des culasses externes et internes du rotor de sortie.

- un surdimensionnement des aimants est nécessaire:

en effet, le facteur  $\frac{n \cdot \Lambda_{ajb \max}}{2} \cdot 2 \cdot \Theta_{aj}$  de proportionnalité du couple utile à  $\Theta_{bj}$

correspond à un flux magnétisant; on retrouverait un coefficient de même nature dans le cas de bobinages séparés. Par rapport à ce dernier, avec des dimensions géométriques comparables, ce facteur se dégrade en raison de l'allongement du chemin magnétique dû à la structure à flux traversant, ce qui implique une augmentation du courant ou des dimensions. Des précautions relatives au risque de démagnétisation des aimants qui fonctionnent régulièrement en opposition vont aussi dans ce sens; les perméances de fuite correspondent à un paramètre d'optimisation du dimensionnement.

Naturellement, la question de la limite de démagnétisation ne se pose pas dans les réalisations asynchrones ou à réluctance; l'allongement du chemin magnétique résultant de la mise en série d'entrefers n'y affecte que les composantes magnétisantes apportées par le bobinage.

- en contrepartie, des réductions sensibles des pertes Joule sont possibles; c'est un point important pour améliorer le rendement et la thermique:

en effet: à géométrie similaire, on conserve sensiblement les potentiels magnétiques  $\theta_{b1}$  et  $\theta_{b2}$  requis pour produire les couples. Or, on dispose pour loger le bobinage unique d'une section correspondant à la somme des sections des bobinages séparés de référence à laquelle s'ajoute potentiellement l'espace libéré par la suppression des culasses; on peut ainsi grossièrement considérer que la section et le volume de cuivre du bobinage unique rapporté à l'un des précédents ont été multipliés par  $k > 2$ . Si la densité de courant de référence était de  $j$  dans chacun des bobinages séparés, les densités  $j_1$  et  $j_2$  des courants composés sont maintenant chacune de l'ordre de  $j/k$ ; sauf cas particulier où les pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont liées, les pertes Joule associées à  $j_1$  et  $j_2$  sont simplement additives:  $P_{Joule} = \rho \cdot V_{Cu} \cdot (j_1^2 + j_2^2)$ ; ( $\rho$  étant la résistivité du conducteur et  $V_{Cu}$  son volume global); cela signifie que les pertes Joule globales sont alors divisées par  $k > 2$ .

- les pertes peuvent être réduites dans les composants électroniques, d'où un autre progrès sur le rendement et le coût associé au dimensionnement:

en effet: si on considère que les pertes dans les composants électroniques sont en bonne partie liées au passage du courant au travers d'une tension de déchet (transistors IGBT, diodes de roue libre des bras de pont) et qu'on exprime grossièrement cette fraction des pertes sous la forme:  $Pertes = V_d \cdot \text{moyenne}(|I|)$ , il vient dans le cas des bobinages séparés:  $Pertes\ globales = V_d \cdot \text{moyenne}(|I_1 \cdot \sin \omega_1 t|) + V_d \cdot \text{moyenne}(|I_2 \cdot \sin \omega_2 t|)$ ; dans les fonctionnements typiques de la transmission électrique sans alimentation électrique, la puissance de la machine 1 est similaire à celle de la machine 2 et cela sous des tensions identiques aux chutes parasites près; on écrira:  $I_1 = I_2 = I$ ; d'où:  $Pertes\ globales = V_d \cdot I \cdot (\text{moyenne}(|\sin \omega_1 t|) + \text{moyenne}(|\sin \omega_2 t|))$ . Dans le cas de la commande en courants composés, le même raisonnement conduit à:  $Pertes\ globales = V_d \cdot I \cdot (\text{moyenne}(|\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t|))$ . Les estimations numériques sur un horizon de temps de quelques périodes montrent un avantage de la commande en courants composés sur ces pertes de l'ordre de 35%, (hors cas très particuliers du type  $\omega_1 = \omega_2$ ).

On va maintenant décrire une variante de réalisation en asynchrone:

Pour préciser ce qui a été dit sur la possibilité de réalisations selon l'invention utilisant des parties actives asynchrones au rotor, la figure 9 donne un exemple d'adaptation d'une cage asynchrone sur l'entrefer 1. Sur cette figure, la référence 21 désigne la culasse magnétique de la cage, la référence 22, les surfaces du circuit ferromagnétique, la référence 23 des anneaux de court-circuit aux extrémités de la cage, la référence 24 des barres conductrices et la référence 25 des espaces non magnétiques.

On suppose ici que le déphasage requis entre galettes successives est obtenu par un décalage angulaire au niveau des systèmes de griffes consécutifs. Les barres conductrices disposées à intervalles réguliers à la périphérie du rotor sont ainsi sensiblement rectilignes et parallèles à l'axe longitudinal. (NB: selon la forme des griffes et de l'espace qui les sépare, il peut être souhaitable ou non de donner à ces barres une inclinaison par rapport à leur direction de référence, comme on le fait souvent dans les machines asynchrones usuelles pour lisser les phénomènes pulsants associés à l'encochage du stator). Les extrémités des barres sont liées électriquement entre elles de chaque côté du rotor par un anneau conducteur, selon le principe usuel des cages asynchrones.

Une première particularité relative à l'isolation électrique des barres conductrices est cependant à noter pour cette cage. On doit en effet éviter les chemins électriques parasites entre barres conductrices: chacun des segments d'une barre qui se trouve dans l'entrefer d'une galette est le siège de deux composantes de force électromotrice associées respectivement aux deux systèmes de courants composés; l'ensemble fonctionne sur la sommation de ces fem sur l'ensemble des galettes; ainsi par exemple, la composante polyphasée parasite destinée à l'autre rotor conduit à une sommation nulle sur l'ensemble des segments de chaque barre. Si des courants intermédiaires aux bouclages par les anneaux d'extrémités peuvent se développer, ils vont être à l'origine de pertes. Pour cette raison, les barres doivent ici être isolées les unes des autres sur leur longueur. Cette isolation peut être obtenue naturellement si le matériau ferromagnétique utilisé n'est pas un bon conducteur électrique (cas des poudres de fer); dans le cas d'une réalisation avec des tôles ferromagnétiques, il faut prévoir l'interposition d'un isolant. Pour la même raison, le matériau ferromagnétique ne peut être massif s'il est électriquement conducteur; on

utilisera donc par exemple des poudres de fer ou bien des empilements de tôles magnétiques.

Une seconde particularité concerne les espaces non magnétiques qui sont ménagés entre les circuits magnétiques associés aux différentes galettes: ces espaces  
5 sont visibles sur la figure 9. Comme cela a déjà été vu, ils constituent une alternative à l'espacement des systèmes de griffes pour limiter les couplages magnétiques par les fuites entre galettes. Des protubérances prévues sur les barres peuvent jouer le rôle de cales entre les éléments ferromagnétiques ainsi fractionnés.

La figure 10 donne une autre variante de réalisation de cage asynchrone  
10 adaptée à l'invention. Elle est présentée en exemple sur la partie externe du rotor que l'on montre en coupe. On retrouve le principe général qui vient d'être décrit avec des barres 24a isolées électriquement sur leur longueur et connectées électriquement à leurs extrémités par des anneaux de court-circuit 23. On retrouve également les espaces non magnétiques 25 entre galettes destinés au découplage. La particularité  
15 vient de ce que les barres conductrices 24a apparaissent comme constituées d'un ensemble de segments délimités par les frontières entre galettes successives; ces segments sont chacun essentiellement rectilignes et parallèles à l'axe longitudinal, mais comportent entre eux un décalage angulaire successif pouvant contribuer partiellement ou totalement à assurer le déphasage requis entre galettes au niveau de  
20 cet entrefer. La continuité électrique entre les segments d'une barre est assurée au niveau des frontières entre galettes par des liaisons qui prennent dans le principe la forme d'arcs de cercle dans le plan perpendiculaire à l'axe longitudinal. Ces liaisons peuvent servir de cales dans les espaces non magnétiques. Comme déjà remarqué ci-dessus pour le rotor intermédiaire, les segments de barre peuvent comporter une  
25 inclinaison par rapport à leur position de référence, et le crénelage de principe entre les segments peut s'en trouver fortement atténué, voire masqué. Ce mode de réalisation où le déphasage est réalisé au rotor permet de choisir librement le positionnement angulaire relatif entre galettes des systèmes de griffes, par exemple sur des critères de minimisation des perméances de fuite entre galettes. En matière de  
30 déphasage, il est aussi possible de jouer sur l'ordre des galettes.

Les cages asynchrones peuvent être réalisées par des procédés variés: des barres conductrices en cuivre peuvent par exemple être rapportées et soudées in situ à leurs anneaux d'extrémité. On peut aussi réaliser d'emblée une cage complète, par exemple en aluminium coulé, sur laquelle on vient rapporter les éléments de circuits magnétiques sectorisés. On peut encore, dans le cas d'utilisation de poudres de fer, envisager un pressage du matériau magnétique sur la cage. La tenue mécanique de ces ensembles peut être obtenue par des solutions de collage, surmoulage, frettage...

Les descriptions qui précèdent permettent maintenant d'introduire plus aisément une autre disposition selon l'invention que l'on va présenter ci-dessous.

10 Cette disposition est illustrée dans son principe sur la figure 11.

Comme précédemment, elle est constituée d'un ensemble polyphasé de  $n$  galettes, avec des bobinages annulaires 6 installés dans un circuit magnétique fixe et deux rotors indépendants 3, 5. Comme dans la disposition à stator à flux traversant qui vient d'être décrite, chaque galette ne reçoit qu'un bobinage unique alimenté selon le principe des courants composés; on obtient ainsi sur l'ensemble des bobinages un double système polyphasé avec  $n1$  et  $n2$  phases. Cependant, ce stator ne débouche plus directement que sur un seul entrefer au lieu de deux: il est maintenant fermé par une culasse et seul subsiste un système de griffes. Les parties actives des deux rotors sont disposées de manière concentrique en vis à vis de ces griffes. Le rotor intermédiaire, c'est à dire celui qui est en regard immédiat du stator, est à flux traversant: cela signifie que, en bonne partie, le flux magnétique de couplage au stator le traverse de part en part de manière radiale, de sorte qu'il interagit avec le second rotor. Ce deuxième rotor est quant à lui équipé de manière usuelle d'une culasse qui assure le bouclage du flux.

25 NB: la figure 11 représente un rotor intermédiaire lié à la source motrice, l'autre étant lié à la sortie de mouvement; un choix inverse est possible. De même, les rotors sont extérieurs au stator, mais pourraient lui être intérieurs.

Entre deux galettes successives, on opère les déphasages angulaires adaptés à la commande à courants composés: ainsi, le calage relatif des parties actives du rotor 3 et du système de griffes du stator sera de  $2\pi/(p.n1)$ , si  $p$  est le nombre de paires de griffes et  $n1$  le nombre de phases du système associé au rotor 3; de même, le calage



relatif des parties actives du rotor 5 et du système de griffes du stator sera de  $2\pi/(p.n2)$ ,  $n2$  étant maintenant le nombre de phases du système associé au rotor 5.

De cette manière, selon un raisonnement du type de celui développé précédemment, on peut montrer qu'il est possible de produire des couples d'interaction stator-rotor 3 et stator-rotor 5 de manière indépendante par la commande à courants composés: le premier système de courants à  $n1$  phases est calé sur la position angulaire électrique et donc la pulsation électrique du rotor 3; son amplitude et sa phase permettent le réglage du niveau de couple associé. Le second système de courants à  $n2$  phases est calé sur la position angulaire électrique et donc la pulsation électrique du rotor 5; son amplitude et sa phase permettent le réglage du niveau de couple associé.

Avec un choix convenable de  $n1$  et de  $n2$  (par exemple parmi ceux de la figure 8), le couple d'interaction du premier système de courants est globalement nul sur le rotor 5; il en va de même pour l'interaction entre le second système de courants et le rotor 3. De même, la composition des interactions entre les deux rotors a une résultante nulle.

De nombreux choix sont possibles pour les parties actives des deux rotors.

La figure 12 propose une illustration avec des rotors asynchrones à cages. Les pulsations de chaque système de courants correspondent à  $p.\Omega1.(1-g1)$  et  $p.\Omega2.(1+g2)$  respectivement,  $g1$  et  $g2$  étant les glissements nécessaires à l'établissement des couples souhaités, ainsi qu'il est connu dans les commandes de machines asynchrones.

Sur cet exemple de la figure 12, la réalisation est à six galettes ( $n=6$ ) de huit paires de griffes ( $p=8$ ).

Sur cette figure, la référence 30 désigne l'ensemble du stator comprenant six galettes équipées chacune d'un bobinage toroïdal dont le flux est distribué à l'entrefer par un système à huit paires de griffes 15, 16. Les galettes sont décalées successivement de  $360^\circ/6/8 = 7,5^\circ$  dans le sens anti-trigonométrique.

La référence 31 désigne un rotor intermédiaire à flux traversant et avec cage asynchrone. Ses barres conductrices 24 s'étendant parallèlement à l'axe du rotor. La structure de ce rotor intermédiaire est identique à celui représenté sur la figure 9.

La référence 32 désigne le rotor externe avec une cage asynchrone.

5 Ses barres conductrices 24a sont constituées de segments parallèles à l'axe longitudinal et décalés successivement de  $360^\circ/3/8/2 = 7,5^\circ$  dans le sens trigonométrique. Il forme avec le stator une double machine à trois phases.

La structure du rotor 32 est identique à celui représenté sur la figure 10.

10 Le rotor intermédiaire est associé à une composante polyphasée du courant à  $n_2=6=n/1$ ; le déphasage correspondant de  $2\pi/(n_2.p)$  est obtenu ici entièrement par le décalage angulaire de  $7,5^\circ$  des systèmes de griffes successifs et les barres conductrices de la cage asynchrone de ce rotor intermédiaire sont essentiellement rectilignes et parallèles à l'axe longitudinal. NB: selon la forme des griffes et de l'espace qui les sépare, il peut être souhaitable ou non de donner à ces barres une  
15 inclinaison par rapport à leur direction de référence, comme on le fait souvent dans les machines asynchrones usuelles pour lisser les phénomènes pulsants associés à l'encochage du stator. Les extrémités des barres sont liées électriquement entre elles de chaque côté du rotor par un anneau conducteur, selon le principe usuel des cages asynchrones.

20 L'autre rotor est associé à une composante polyphasée du courant à  $n_1=3=n/2$ ; le déphasage correspondant de  $2\pi/(n_1.p)$  est réalisé pour moitié par le décalage angulaire de  $7,5^\circ$  des systèmes de griffes successifs qui a déjà été mentionné; le complément de déphasage est opéré dans le sens opposé sur les barres conductrices elles-mêmes de la cage asynchrone de ce rotor: une barre conductrice apparaît ainsi  
25 comme constituée d'un ensemble de segments délimités par les frontières entre galettes successives; ces segments sont essentiellement rectilignes et parallèles à l'axe longitudinal, mais ils sont décalés entre eux successivement de  $7,5^\circ$ . De cette façon, le déphasage sur des galettes successives entre la barre et le système de griffes est de  $7,5^\circ+7,5^\circ=15^\circ$ . La continuité électrique entre les segments d'une barre est  
30 assurée au niveau des frontières entre galettes par des liaisons qui prennent dans le principe la forme d'arcs de cercle dans le plan perpendiculaire à l'axe longitudinal. Comme déjà remarqué ci-dessus pour le rotor intermédiaire, les segments de barre

peuvent comporter une inclinaison par rapport à leur position de référence, et le crénelage de principe entre les segments peut s'en trouver fortement atténué, voire masqué. Les extrémités des barres sont liées électriquement entre elles de chaque côté du rotor par un anneau conducteur, selon le principe usuel des cages asynchrones.

Le choix retenu sur cet exemple pour réaliser le déphasage peut naturellement comporter de nombreuses variantes: on aurait pu choisir par exemple de répartir le déphasage sur les barres des deux rotors: les systèmes de griffes auraient alors été décalés de  $11,25^\circ = 7,5^\circ + 1/2 * 7,5^\circ$ ; les barres du rotor intermédiaires auraient été constituées en segments décalés de  $3,75^\circ = 1/2 * 7,5^\circ$  pour conserver le déphasage relatif de  $7,5^\circ$ ; les barres du rotor externe auraient été calées à l'inverse de  $-3,75^\circ$ . On comprend qu'il est aussi possible de jouer sur l'ordre des galettes.

Les observations précédentes sur l'isolation électrique des barres, le choix de matériaux magnétiques résistifs et la limitation des couplages magnétiques par les fuites entre les galettes demeurent valables.

En résumé, selon l'invention qui s'applique à une transmission électrique, les stators polyphasés des deux machines électriques comportent des bobinages annulaires et sont intégrés dans des espaces adjacents; la distribution du flux alternatif dans l'entrefer s'opère par des systèmes de griffes ou des dentures homopolaires.

Les rotors peuvent être de différents types (à aimants, asynchrones, ...), et notamment à réluctance variable à double saillance avec bouclage transverse du flux au rotor.

En variante selon l'invention, les bobinages annulaires des deux stators sont mis en commun et alimentés par une commande à courants composés avec un unique onduleur.

La disposition peut alors être à stator intermédiaire à "flux traversant" ou bien à rotor intermédiaire à "flux traversant".

## REVENDEICATIONS

1. Transmission électrique, notamment pour véhicule automobile, comprenant deux machines électriques, l'arbre (1) de l'une des machines électriques étant relié à une source d'énergie motrice, cette machine convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique, l'autre machine électrique convertissant l'énergie électrique en énergie mécanique, son arbre (14) étant relié à l'élément à entraîner, les rotors (3, 5) des deux machines étant disposés concentriquement ou axialement l'un par rapport à l'autre, ces deux rotors (3, 5) coopérant avec des stators dont les bobinages (6, 7) sont disposés à l'intérieur de l'espace défini par les deux rotors (3, 5), caractérisé en ce que lesdits bobinages comprennent plusieurs bobinages annulaires (6, 7) juxtaposés dans ledit espace, ces bobinages étant alimentés par des courants alternatifs déphasés les uns par rapport aux autres.

2. Transmission électrique selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'un (5) des rotors est monté en rotation sur l'arbre (1) de l'autre rotor (3) et entraîne en rotation un arbre (14) décalé axialement de l'arbre (1) du premier rotor (5).

3. Transmission électrique selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisée en ce que les bobinages statoriques (6, 7) sont disposés dans l'espace annulaire compris entre les deux rotors (3, 5) et comprennent une première couche annulaire de bobinages (6) coopérant avec l'un des rotors, entourant une seconde couche annulaire de bobinages (7) coopérant avec l'autre rotor, les deux couches annulaires de bobinages (6, 7) étant liées mécaniquement l'une à l'autre.

4. Transmission électrique selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que chaque bobinage (7) est disposé dans un noyau (14a) en matière ferromagnétique recouvert latéralement de chaque côté par un flasque (15, 16) en matière ferromagnétique comportant en regard du rotor des griffes engagées entre les griffes du flasque situé sur l'autre côté du noyau (14a).

5. Transmission électrique selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que chaque bobinage (7) est disposé dans un noyau (14a) en matière ferromagnétique

recouvert latéralement de chaque côté par un flasque (15, 16) en matière ferromagnétique comportant en regard du rotor des dents (18) dirigées vers le rotor.

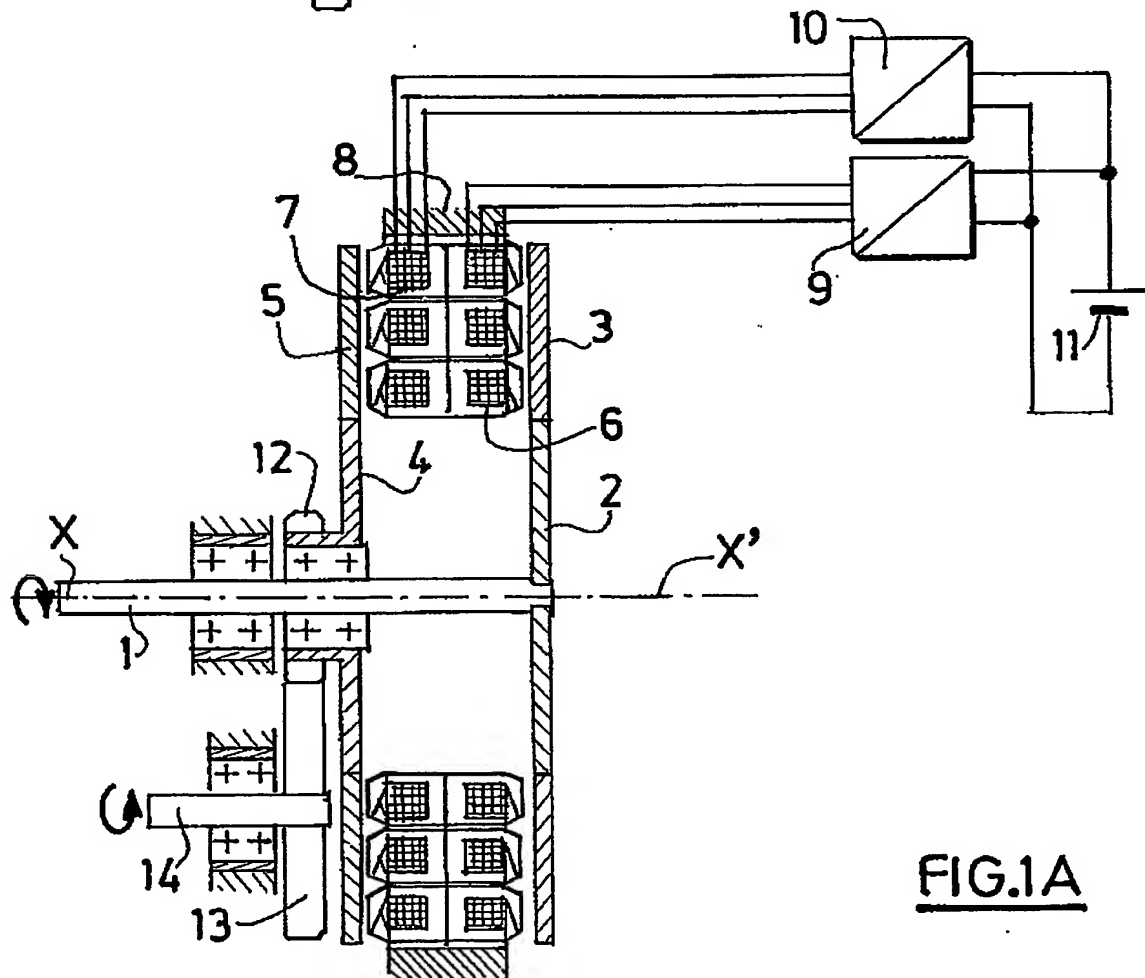
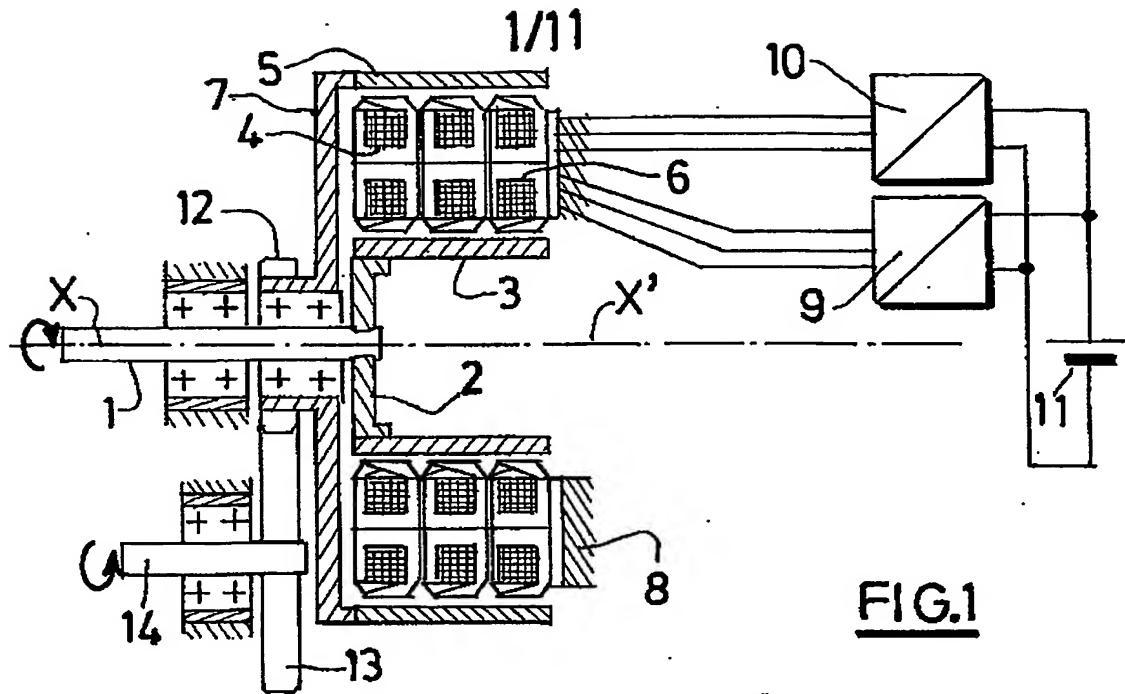
6. Transmission électrique selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisée en ce  
5 que chaque rotor (5) comporte à sa périphérie une culasse cylindrique en matière ferromagnétique portant sur sa face interne dirigée vers les bobinages statoriques (7), une série d'aimants.

7. Transmission électrique selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisée en ce  
10 que chaque rotor (5) comporte sur sa périphérie une série de plots ferromagnétiques s'étendant en regard des bobinages statoriques (7).

8. Transmission électrique selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisée en ce que l'espace annulaire compris entre les deux rotors (3, 5) comporte une seule série de  
15 bobinages (7) juxtaposés.

9. Transmission électrique selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisée en ce que les surfaces périphériques de deux rotors (3, 5) sont adjacents l'une à l'autre et les bobinages annulaires (6) du stator sont situés en regard de la surface interne du rotor qui  
20 est situé à l'intérieur de l'autre rotor.

10. Transmission électrique selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisée en ce qu'elle comprend un stator (30) constitué par plusieurs galettes juxtaposées comportant chacune un bobinage annulaire et portant sur leur périphérie des griffes ferromagnétiques  
25 (15, 16) engagées entre les griffes de la périphérie de la galette voisine, un rotor intermédiaire (31) formant une cage asynchrone comportant des barres conductrices (24) parallèles à l'axe du rotor (31) et une série de plots ferromagnétiques (22) située entre les barres (24), ce rotor intermédiaire (31) étant entouré par un rotor extérieur (32) comportant des barres conductrices (24a) constituées de segments parallèles à l'axe du rotor et décalés  
30 angulairement les uns par rapport aux autres et une série de plots ferromagnétiques située entre les barres (24a).



2/11

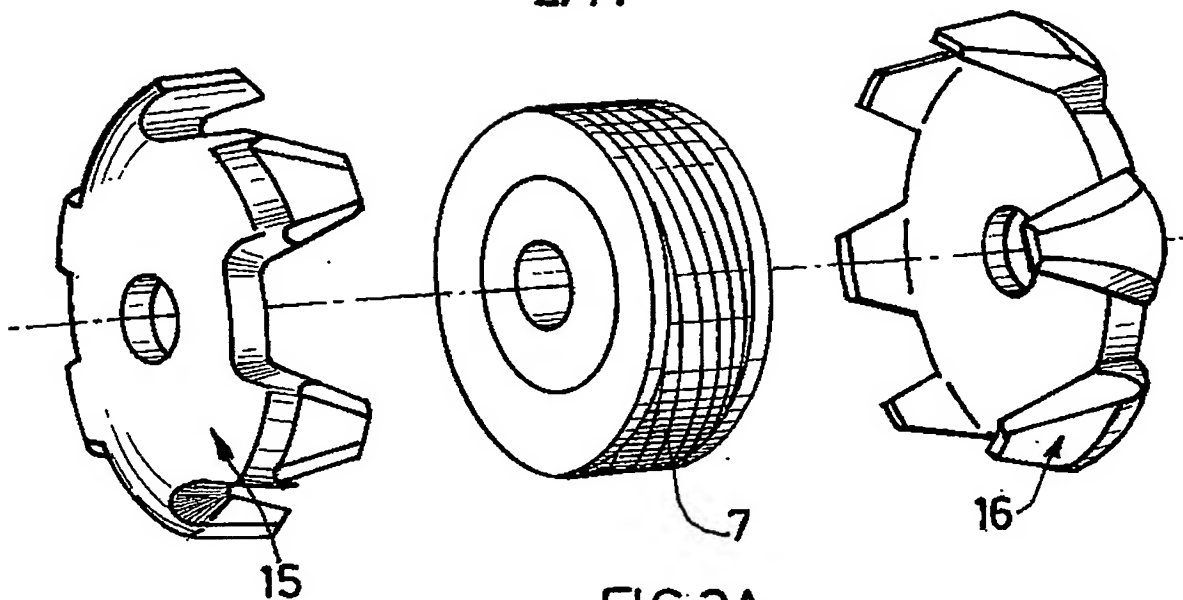


FIG. 2A

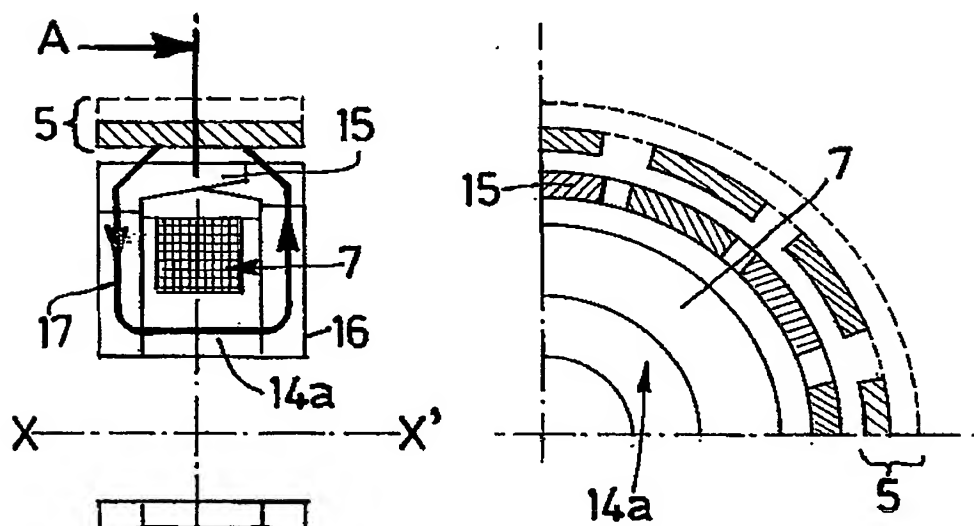


FIG. 2C

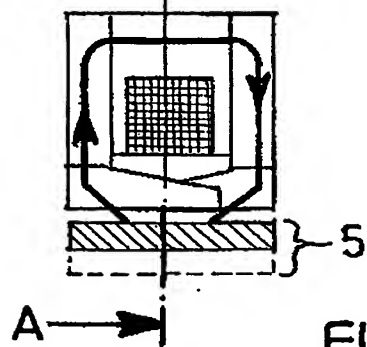
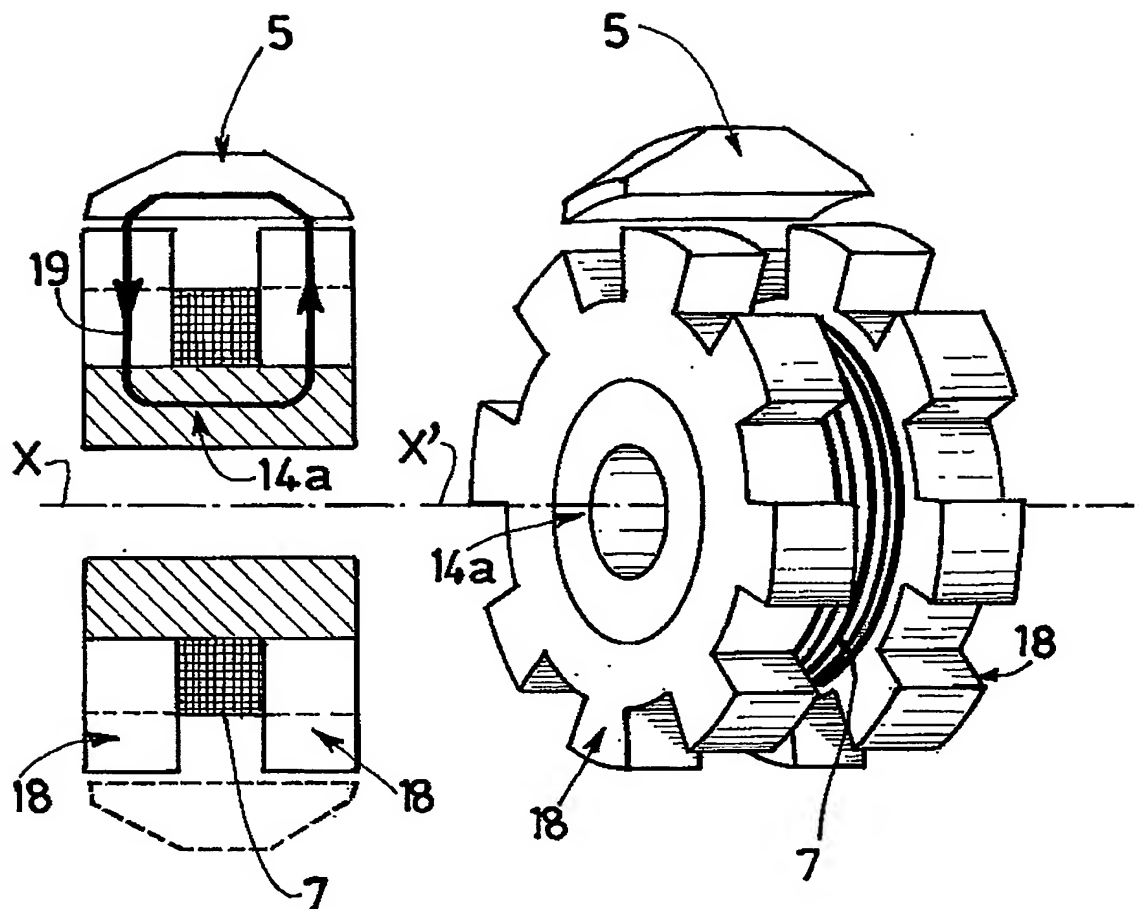


FIG. 2B

3/11

FIG.3



4/11

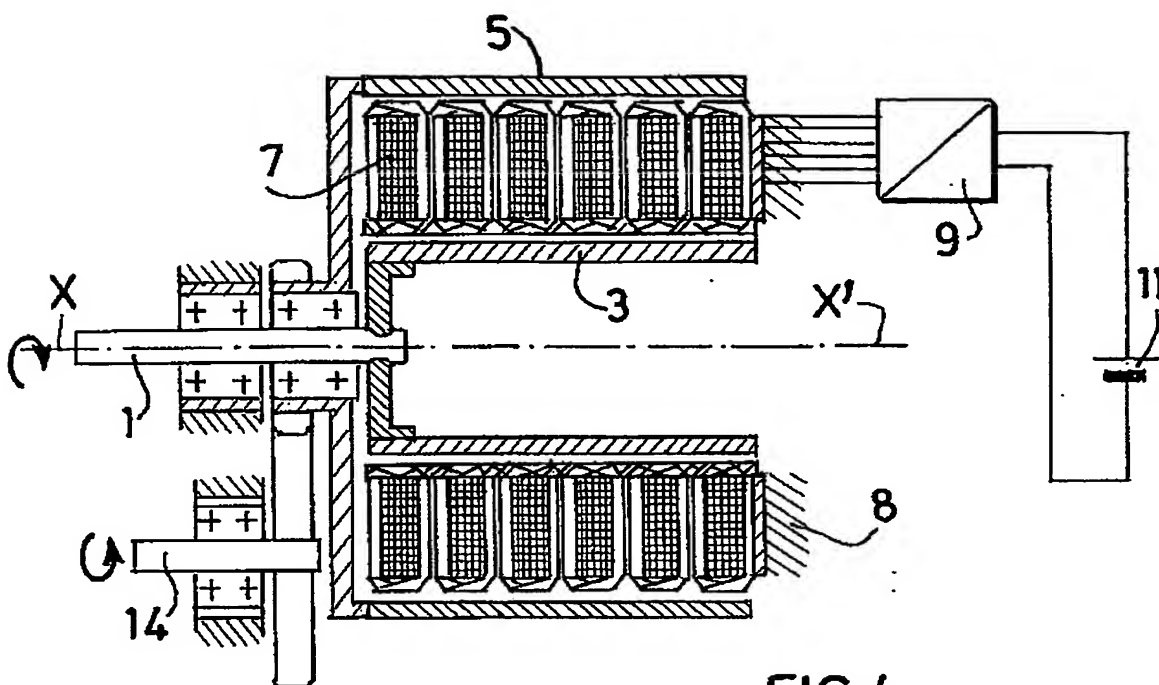


FIG. 4

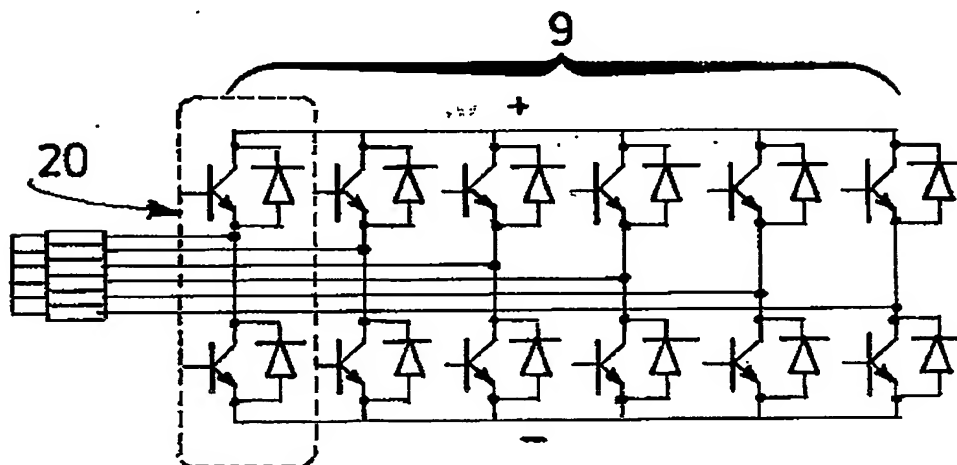
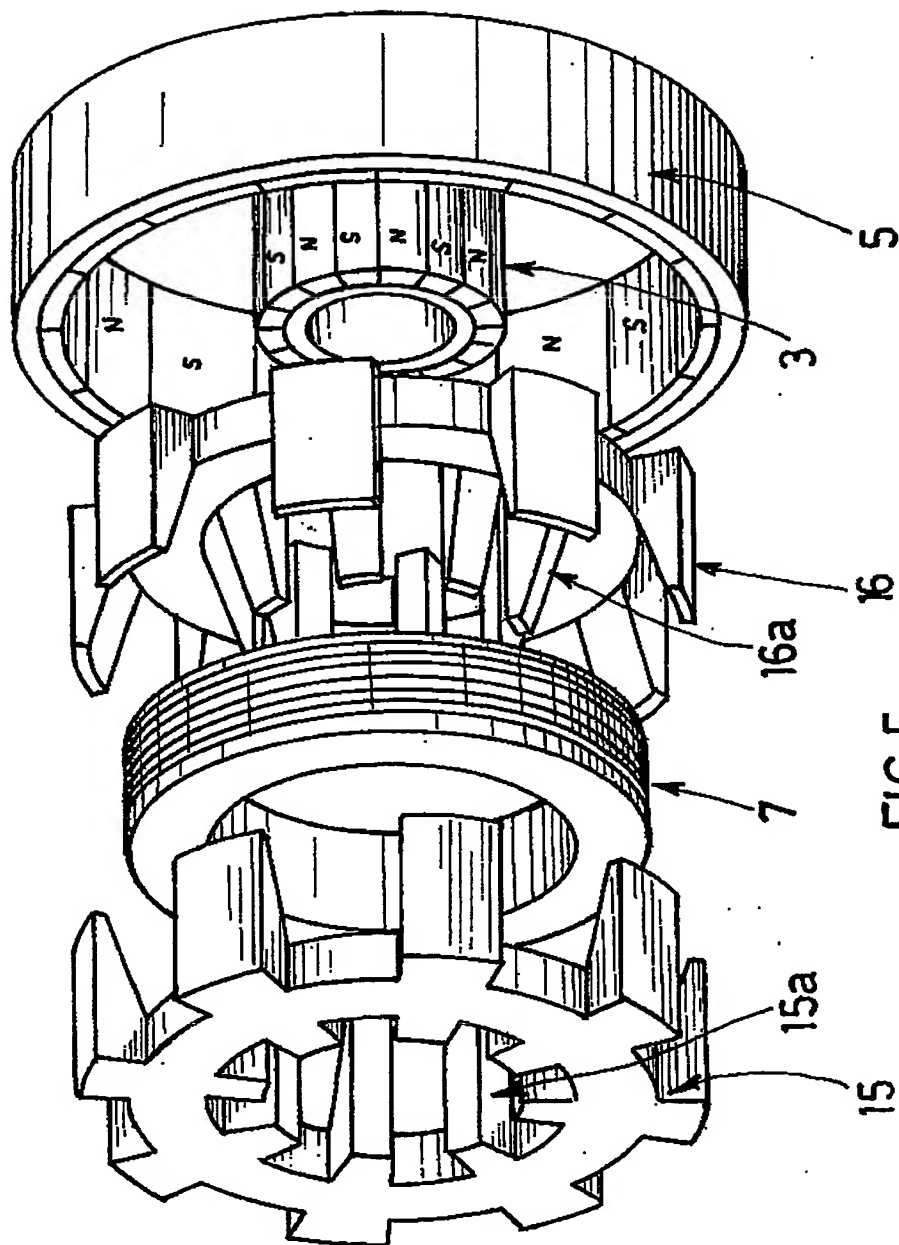


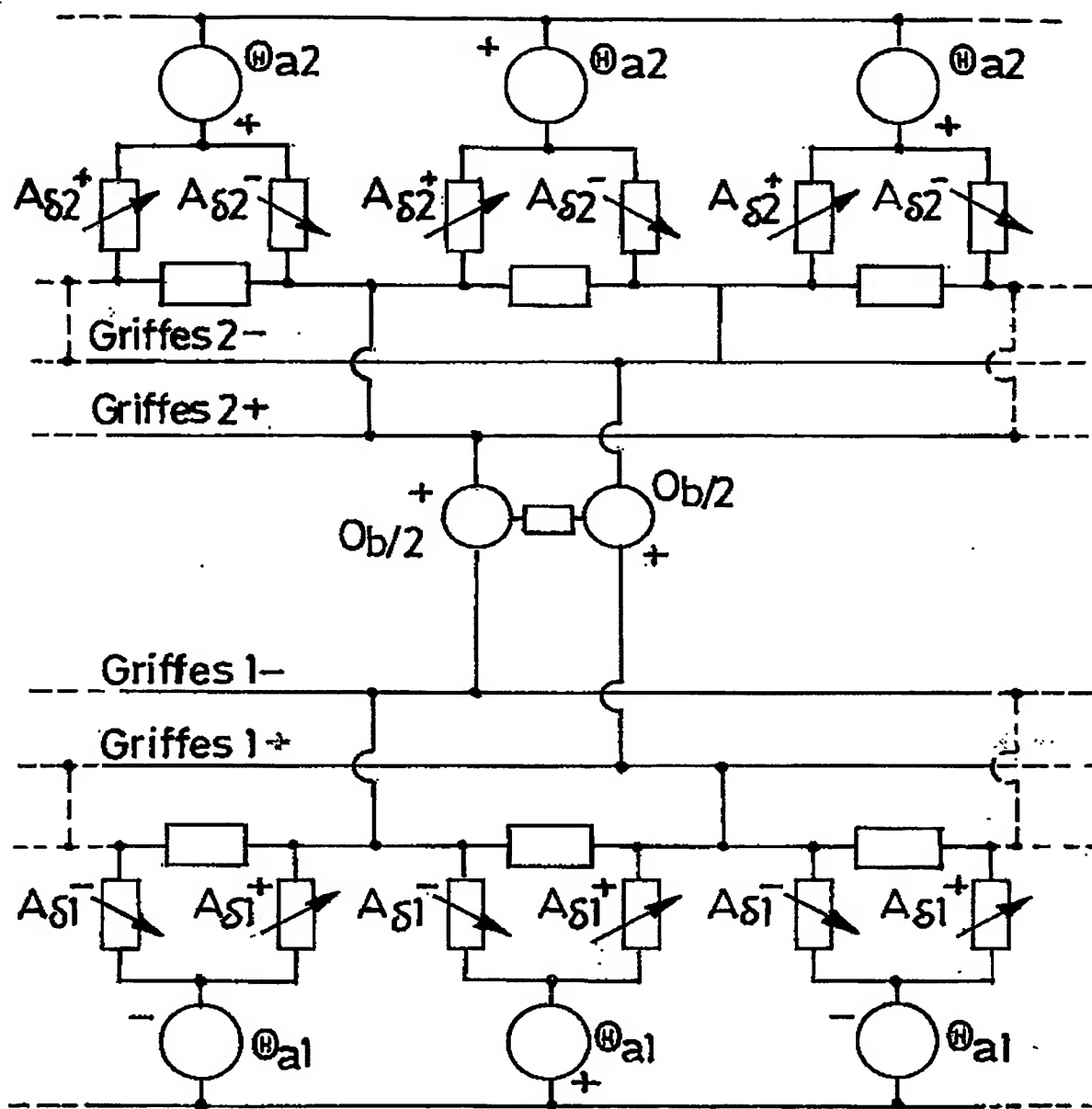
FIG. 4A

5/11

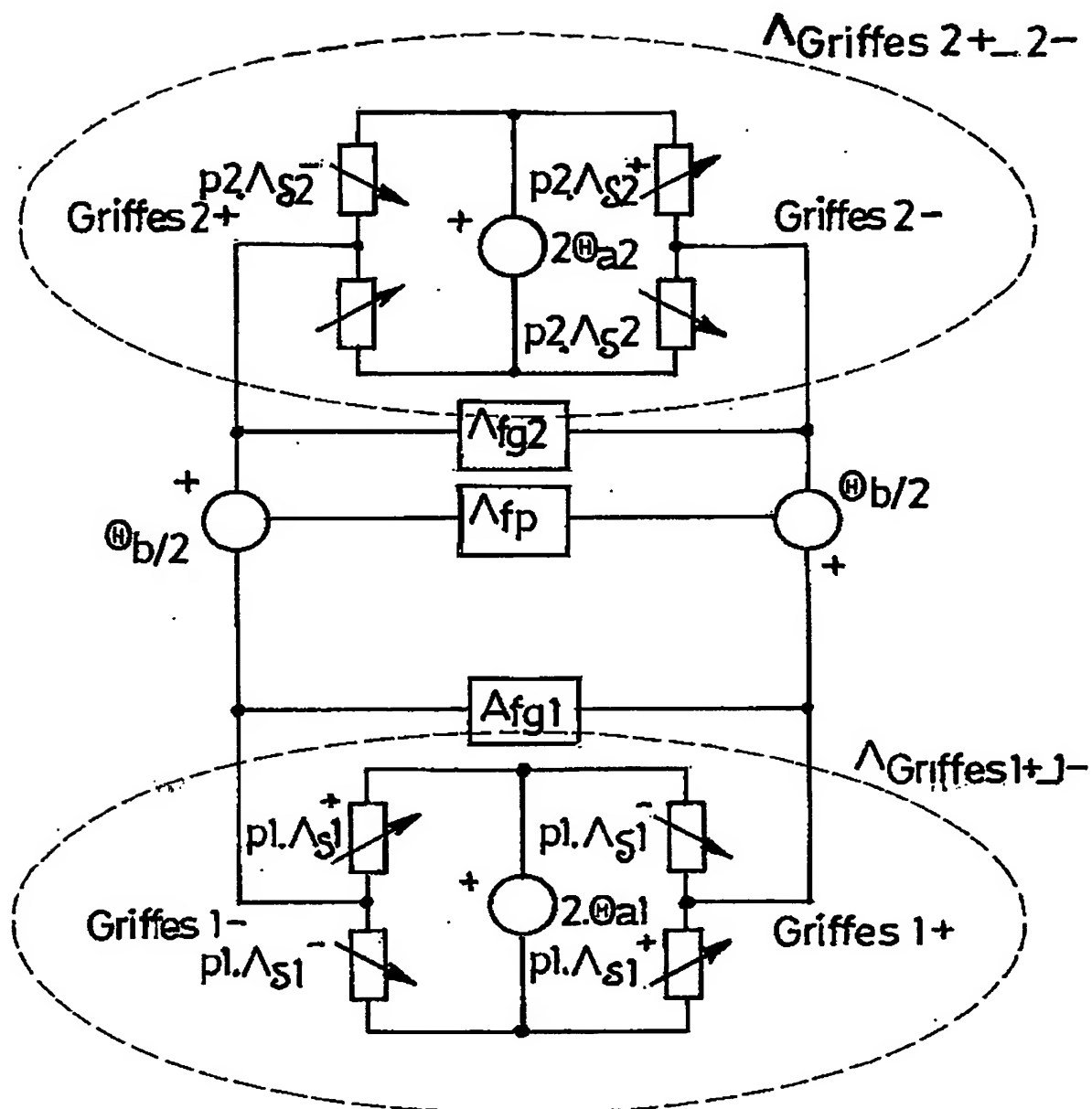


**FIG. 5**

6/11

FIG.6

7/11

FIG.7

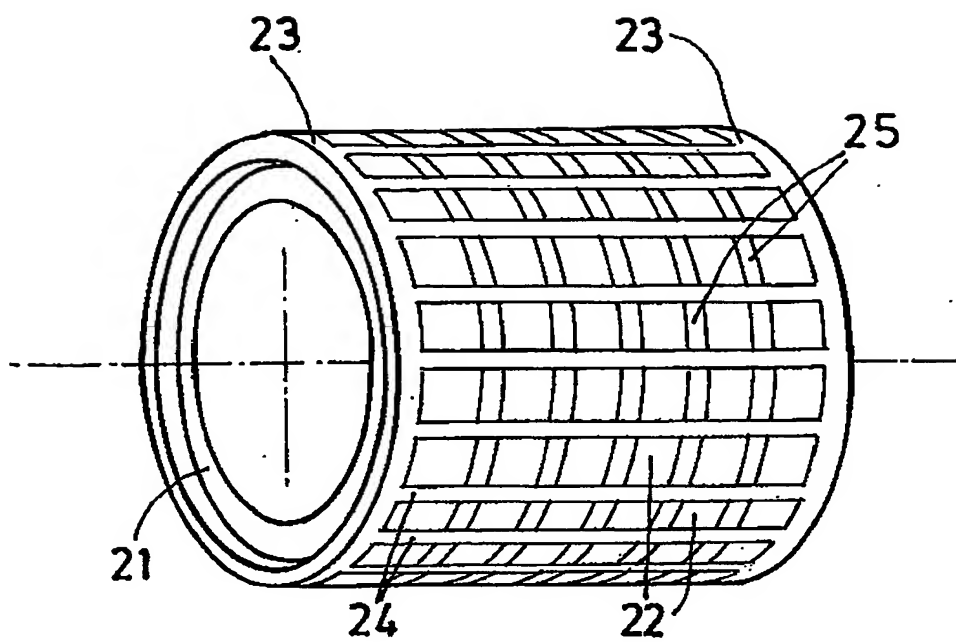
EXEMPLES DE DISPOSITIONS A COURANTS COMPOSES  
PERMETTANT L'ANNULATION DES COUPLES PULSANTS:

n	n	n	k $=n/n_1$	k $=n/n_2$	Nombre de bras de l'onduleur
6	3	6	2	1	6
8	4	8	2	1	8
9	3	9	3	1	9
12	3	4	4	3	12
etc.					

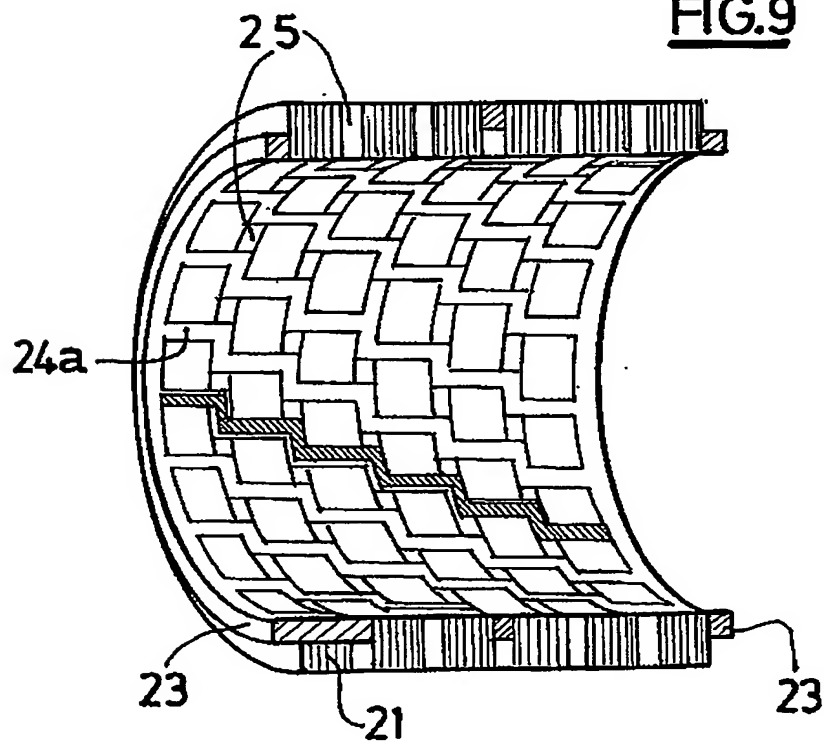
avec n:nombre de galettes  
n<sub>1</sub>:nombre de phases sur l'entrefer 1  
n<sub>2</sub>:nombre de phases sur l'entrefer 2

FIG.8

9/11



**FIG. 9**



**FIG. 10**

10/11

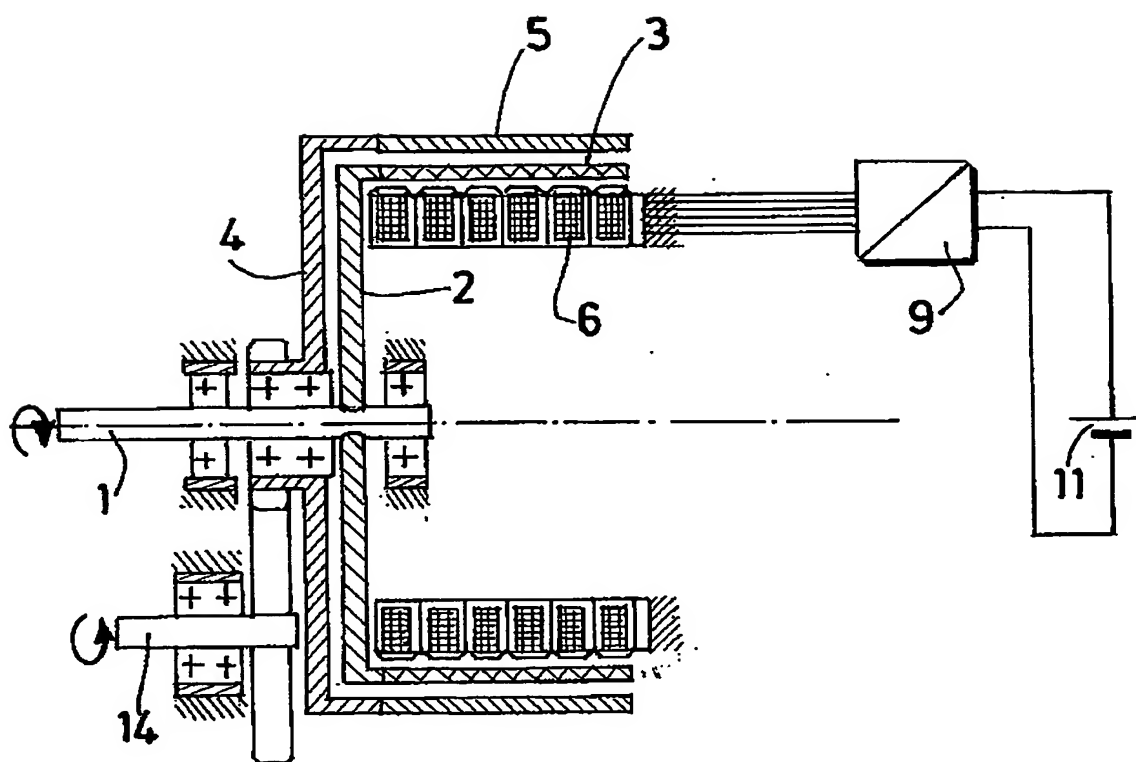


FIG.11

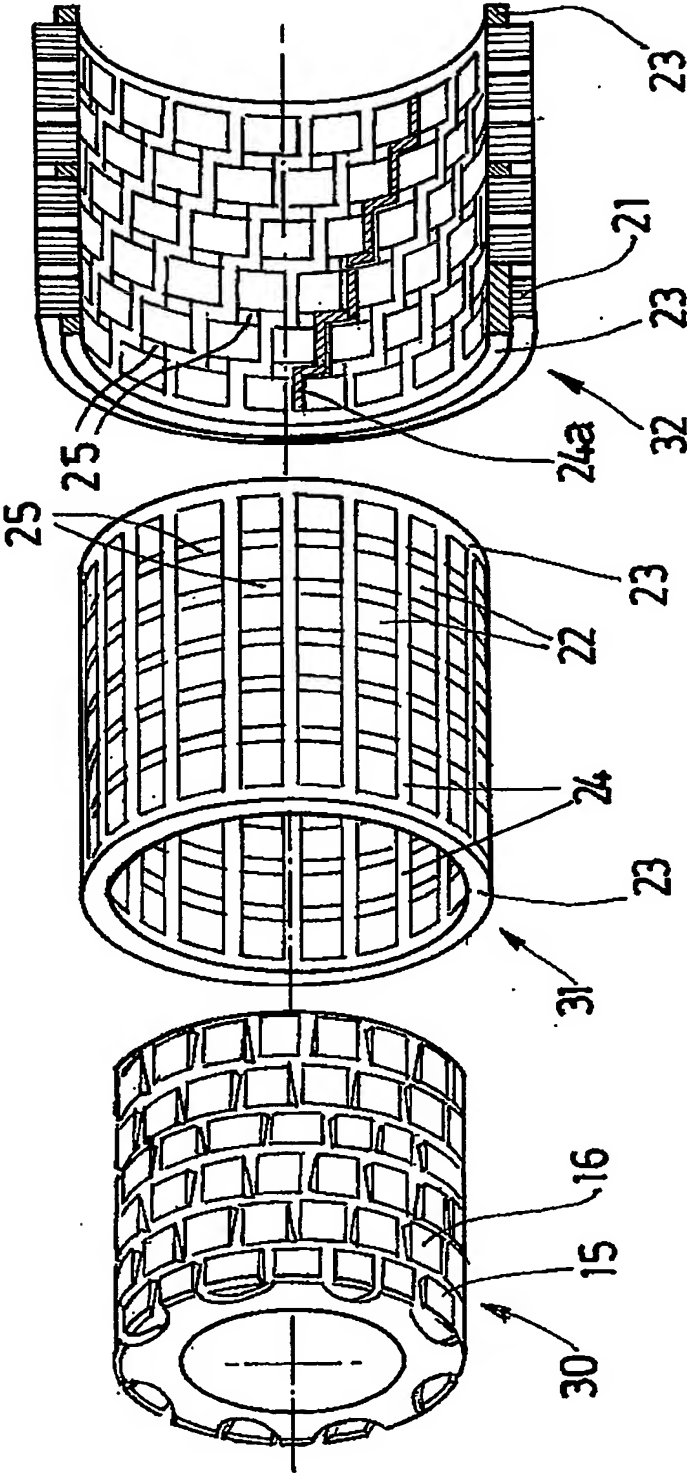


FIG.12